12 – FRAGMENTAÇÃO DE SÓLIDOS

Os objetivos da fragmentação dos sólidos podem ser classificados como:

- Para a obtenção de blocos de dimensões trabalháveis;
- Para aumentar a área externa, melhorando reações;
- Para proporcionar mistura íntima de dois ou mais sólidos.

Podem-se citar os exemplos: a moagem de combustível sólido antes da queima, a moagem de cimento para facilitar a pega, o corte de madeira antes do cozimento para a produção de celulose e a moagem de sementes oleaginosas para acelerar a extração com solventes.

Os equipamentos podem ser divididos em dois tipos, conforme o tamanho das partículas: britadores (fragmentação mais grosseira) e moinhos (fragmentação fina).

	Alimentação	Produto
BRITADORES		
• Primários (grosseiros)	10 cm até 1,5 m	0,5 m até 5 cm
• Secundários (intermediários)	0,5 cm até 5 cm	0,1 cm até 0,5 cm
MOINHOS		
• Finos	0,2 cm até 0,5cm	0,074 cm
• Coloidais	até 0,2 cm	2 μm

Uma grande variedade de equipamentos pode ser oferecida pelos fabricantes tradicionais do ramo. Os modelos se diferem pelos detalhes construtivos e de modo geral apresentam tanto vantagens como desvantagens em cada situação particular.

A moagem é uma operação que pode ser realizada a seco ou a úmido, esta última facilita um melhor controle de pó e consume menos energia, além de ser menos poluente. Sabe-se que uma pequeníssima parte da energia total fornecida à máquina, de 0,1 a 2%, é utilizada para fraturar o material, quase toda a energia é dissipada pelo aquecimento do material que pode acarretar a fusão ou decomposição do material. A operação pode ser contínua ou em bateladas. A avaliação do consumo de energia pode ser feita por diversas fórmulas empíricas. As figuras 12.1 1 12.3 abaixo mostram alguns exemplos esquemáticos de equipamentos.

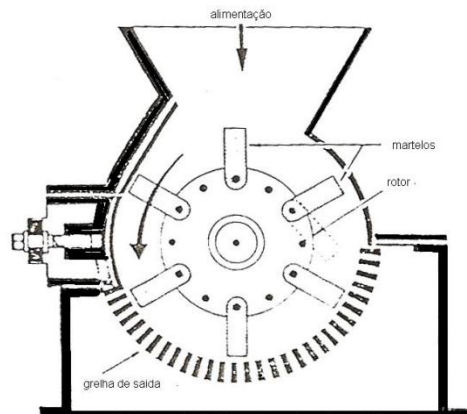



Figura 12.1 – Britador de martelos

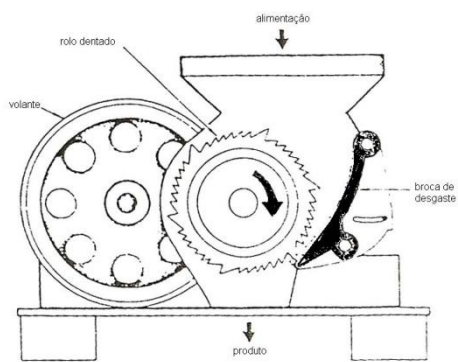



Figura 12.2 – Moinho de rolo dentado

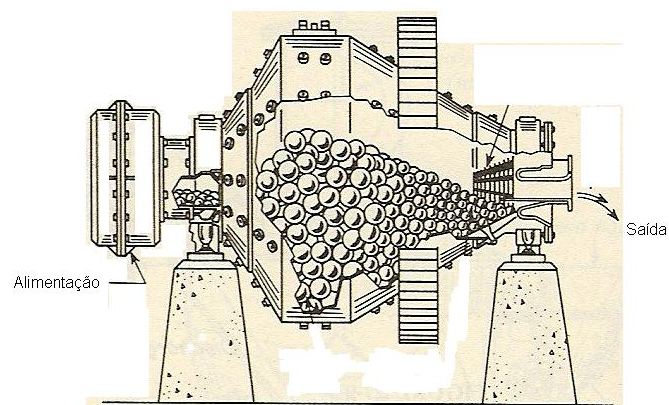



Figura 12.3 – Moinho de bolas

13 – PENEIRAMENTO

É uma operação de separação mecânica que tem por finalidade a obtenção de fração com partículas de sólidos de mesmo tamanho. A separação ocorre pela passagem ou não das partículas pela malha de abertura pré-estabelecida.

Uma peneira separa apenas duas frações que são ditas não classificadas, pois só se conhece uma das medidas extremas de cada fração conhecida. Com a utilização de mais peneiras é possível se obter frações classificadas. Neste caso, não se obtém um simples peneiramento, mas uma classificação granulométrica. A análise granulométrica é feita por peneiras padronizadas quanto à abertura das malhas e a espessura dos fios de que são feitas.

Existem diversas séries de peneiras, como a British Standart (BS), a Intitute of Mining and Metalurgy (IMM) e a série Tyler, que é mais utilizada no Brasil. Esta consta de 14 peneiras e tem como base uma peneira de 200 malhas por polegada (200 mesh), feitas com fios de espessura de 0,053 mm, que dá uma abertura livre de 0,074 mm. As demais peneiras são colocadas acima desta no ensaio. A tabela 13.1 mostra a abertura livre entre as malhas e o diâmetro do fio. A figura 13.1 mostra em seqüência exemplos: na primeira imagem, uma peneira tyler com a tampa e o fundo, a segunda, um conjunto de peneiras, e na terceira imagem, o equipamento de análise granulométrica. Normalmente, estes aparelhos são utilizados para ensaios laboratorias.

Tabela 13.1 – Peneiras da série Tyler

Malha	Abertura livre		Diâmetro do fio
	polegadas	mm	(mm)
3	0,263	6,68	1,78
4	0,185	4,699	1,65
6	0,131	3,327	0,914
8	0,093	2,362	0,813
10	0,065	1,651	0,889
14	0,046	1,168	0,635
20	0,0328	0,833	0,437
28	0,0232	0,589	0,318
35	0,0164	0,417	0,310
48	0,0116	0,295	0,234
65	0,0082	0,208	0,183
100	0,0058	0,147	0,107
150	0,0041	0,104	0,066
200	0,0029	0,074	0,053

Figura 13.1 – Uma peneira com a tampa e o fundo; um conjunto de peneiras e o aparelho para análise granulométrica

Os equipamentos utilizados pela indústria são classificados como peneiras:

- *Estacionárias*: são equipamentos simples, robustos e econômicos, compostos de telas e grelhas. Operam de forma descontínua e entopem com facilidade (fig. 13.2).

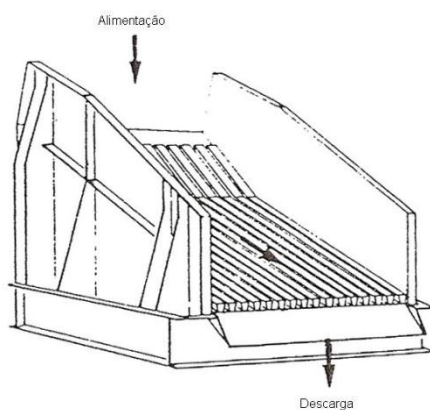



Figura 13.2 – Peneira estacionária

- *Rotativas*: são levemente inclinadas, giram com baixa velocidade e são bastante longas (Fig. 13.3).

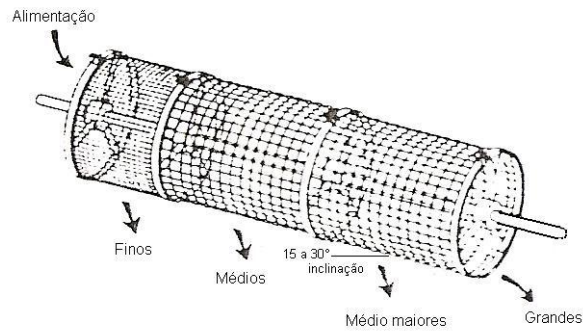



Figura 13.3 – Peneira rotativa

- *Agitadas*: podem ser horizontais ou verticais (Fig. 13.4).

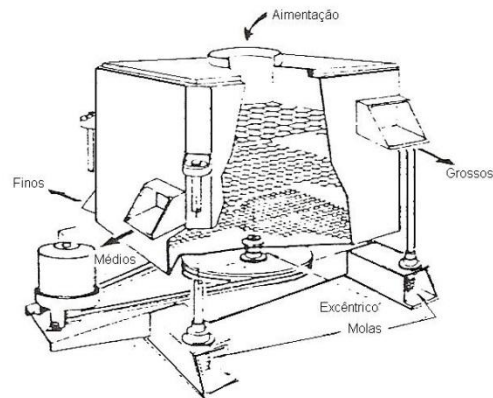



Figura 13.4 – Peneira agitada

- *Vibratórias*: estrutura ou tela vibrada (Fig.13.5).

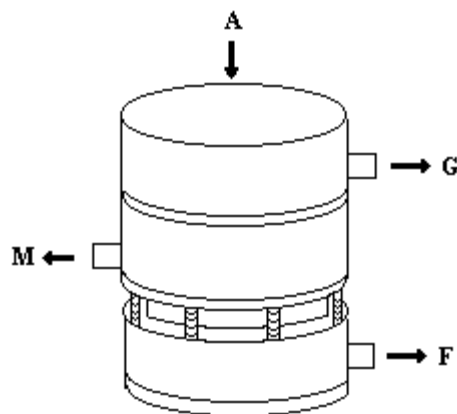



Figura 13.5 – Peneira vibratória

14 – OPERAÇÕES DE SEPARAÇÕES MECÂNICAS

As separações mecânicas podem ser classificadas em função de quatro propriedades: tamanho das partículas, densidade, inércia e propriedades eletromagnéticas. Existem outros critérios de classificação e muitos são os equipamentos utilizados. Apresentam-se aqui os equipamentos mais usados na indústria usando-se o critério de sistemas:

- Sólido + sólido
- Sólido + líquido
- Sólido ou líquido + gases
- Líquido + líquido (imiscíveis)

14.1 – Separação sólido + sólido

a) Câmaras de decantação (Fig. 14.1)

A suspensão dos sólidos no fluido é alimentada através de um duto numa caixa relativamente profunda. Na câmara as partículas grosseiras decantam rapidamente e ficam no primeiro compartimento, enquanto as partículas menores são carregadas para mais adiante e recolhidas em outros compartimentos.

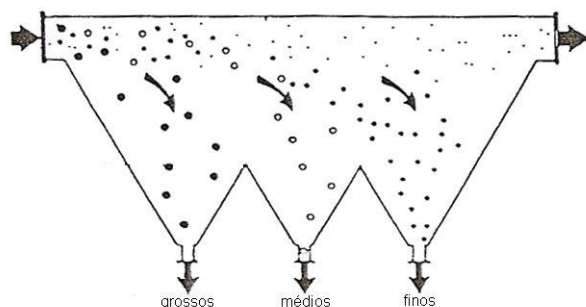



Figura 14.1 – Câmara de decantação

b) Spitzkasten (Fig. 14.2)

O equipamento conta com uma série de recipientes piramidais montados com os vértices para baixo. Os sólidos grossos sedimentam e os finos são arrastados por uma corrente ascendente de água, saindo do primeiro compartimento diretamente para o segundo de maior dimensão e assim por diante.

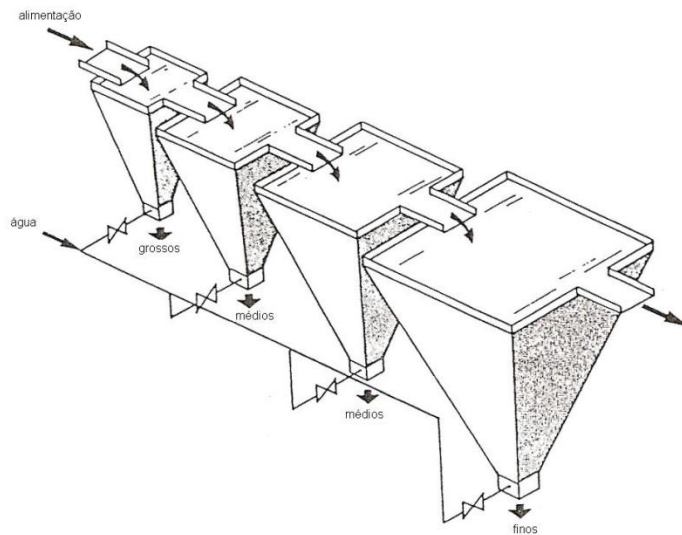



Figura 14.2 – Spitzkasten

c) Classificação helicoidal (Fig.14.3)

A suspensão é alimentada continuamente num ponto intermediário do classificador. As partículas grosseiras decantam e chegam no fundo da calha inclinada onde são arrastadas mecanicamente por um helicóide até a saída.

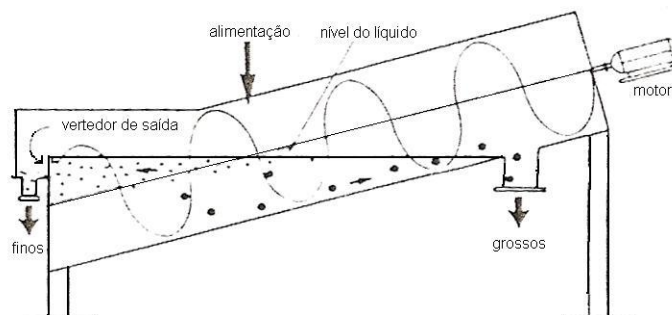



Figura 14.3 – Classificador helicoidal

d) Flotação

A flotação baseia-se no fenômeno físico do molhamento ou umectabilidade das superfícies dos sólidos por líquidos. A umectabilidade depende da maior ou menor possibilidade de um líquido molhar a superfície e isto depende do ângulo de contato com o sólido (Fig. 14.4).

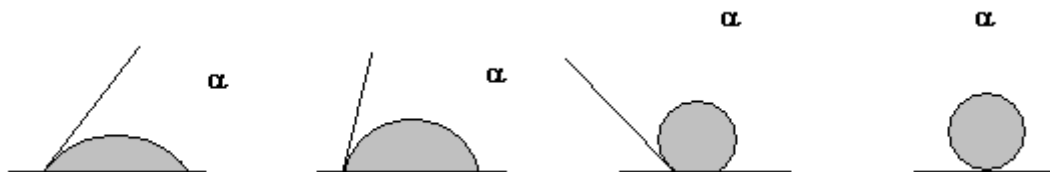



Figura 14.4 – Ângulos de molhamento de líquidos em superfície

O ângulo α de molhamento é tanto maior quanto menor for a capacidade do líquido em molhar o sólido espalhando-se pela sua superfície.

O negro de fumo, por exemplo, é molhado com muito mais facilidade por um líquido orgânico do que pela água, ao passo que a areia se comporta de maneira oposta. Se uma mistura de água, areia e negro de fumo for agitada na presença de benzeno e depois deixada em repouso, a areia ficará na camada de água e o negro de fumo flutuará no benzeno. Solventes orgânicos, por questões econômicas e ecológicas, são substituídos por agentes espumantes, como o óleo de pinho, que causam o mesmo efeito. Conforme mostra a fig. 14.5, ar é borbulhado na mistura em questão, na medida que as bolhas de ar formadas pelo agente espumante sobem, elas carregam as partículas adsorvidas para cima.

Figura 14.5 – Flotador

e) Separação magnética

A separação magnética baseia-se na diferença de atração sofrida pelas partículas sólidas ao passarem por um eletro-ímã. Se um dos sólidos for magnético poderá ser desviado de sua trajetória, enquanto que as outras partículas que não sofrem a ação do campo magnético. Tal situação promove a separação. Atualmente, estas operações podem ser muito bem controladas permitindo separar metais com características magnéticas quase idênticas. Os materiais sólidos, principalmente os minérios, possuem características eletromagnéticas variadas. A tabela 14.1 apresenta valores de atratabilidade de diversos materiais sólidos.

Tabela 14.1– Eletromagnetismo de alguns materiais

Material	Atratabilidade relativa
Ferro	100
Magnetita (F_e3O_4)	40
Hematita (Fe_2O_3)	1,3
Quartzo (SiO_2)	0,37
Pirita (FeS_2)	0,23
Gesso ($CaSO_4.2H_2O$)	0,12
Galena (PbS)	0,04

f) Separação eletrostática (Fig. 14.6)

Quando as partículas sólidas de um bom condutor entram em contato com uma superfície fortemente carregada de eletricidade, elas se eletrizam com carga do mesmo sinal que a da superfície até serem removidas mecanicamente.

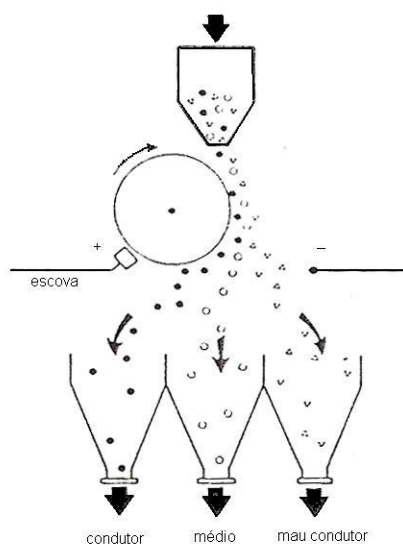



Figura 14.6 – Separador eletrostático de cilindro giratório

14.2 – Separação sólido + líquido

Muitos produtos industriais são suspensões de sólidos em líquidos, sendo necessário isolar as fases para separar os produtos. Os métodos empregados podem ser classificados de acordo com dois critérios:

- *Movimento relativo das fases* e

- *Força propulsora*: gravitacional, centrífuga, por diferença de pressão e eletromagnéticas.

14.3 - Decantação (Fig. 14.7)

Pode-se operar em batelada ou em regime contínuo. O equipamento mais usado é o decantador de rastelos, que são braços com palhetas inclinadas que conduzem a lama para a saída central. Os diâmetros destes decantadores podem variar de 10 a 100 metros com profundidades de 3 a 4 metros.

Figuras 14.7 – Decantador e braços com restelos

a) Operações centrífugas

A força gravitacional que atua sobre as partículas é substituída pela força centrífuga, de maior intensidade e que pode ser controlada pela rotação. Pode ser aplicada em soluções com sólidos de densidades muito próximas, em misturas muito pobres em líquido ou em sólido.

Para saber-se a ação da força centrífuga, pode-se compará-la à força gravitacional:

força centrífuga $F = m.w^2.r$

$$w(rpm) = \frac{2\pi N}{60}$$

$$F = m.\left(\frac{2\pi N}{60}\right)^2.r = 0,00112.m.r.N^2$$

fator de multiplicação do campo gravitacional $k = \frac{F}{m} = 0,00112.r.N^2$

Por exemplo, se uma centrífuga de 1 metro de diâmetro operar com uma rotação de 2000 rpm, o fator de multiplicação do campo gravitacional será:

$$K = 0,00112 \cdot 0,5 \cdot (2000)^2 = 2240$$

Isto significa que atuará sobre as partículas uma força centrífuga igual à 2240 vezes o seu próprio peso.

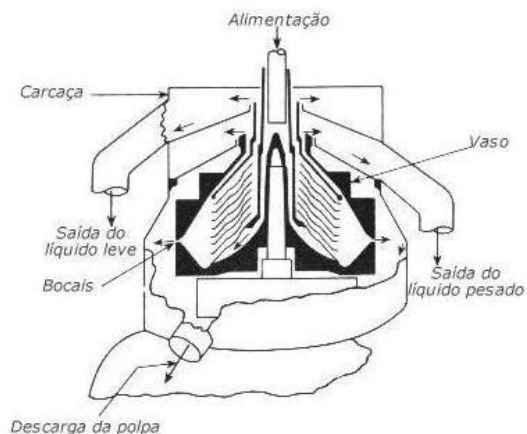
Na indústria se classifica: K de 3500 a 40000, centrífugas decantadoras e acima, ultracentrífugas.

As centrífugas industriais são decantadoras e filtrantes:

- *Centrífugas decantadoras*: servem para filtrar ou espessar suspensões. As partículas são dirigidas para a parede do tambor, quando este gira e as partículas se acumulam na parede e posteriormente são retiradas (Figura 14.7).

Figuras 14.7 – Centrífuga decantadora

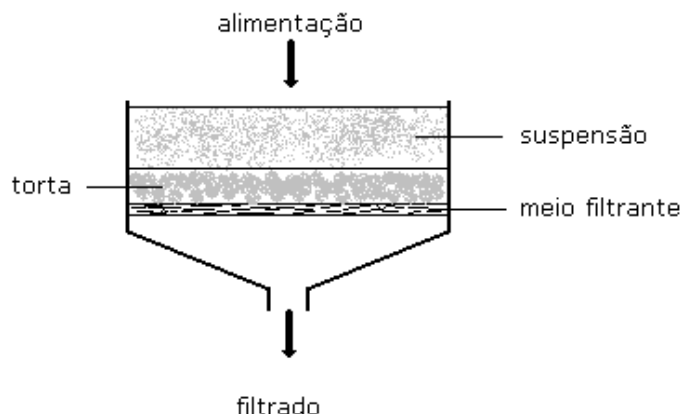
- *Centrífugas filtrantes*: é uma cesta que gira em alta velocidade e cuja parede é feita de tela ou placa furada. Os sólidos vão para a periferia e formam uma torta (leito poroso formado pelas partículas) cuja espessura vai aumentando à medida que a operação prossegue. O filtrado passa através da torta e da tela é recolhido (Fig.14.8).

A maior vantagem das centrífugas filtrantes em relação aos filtros comuns é a redução da quantidade de filtrado que fica retido na tela, 7% para 3%.

Figuras 14.8 – Centrífuga filtrante

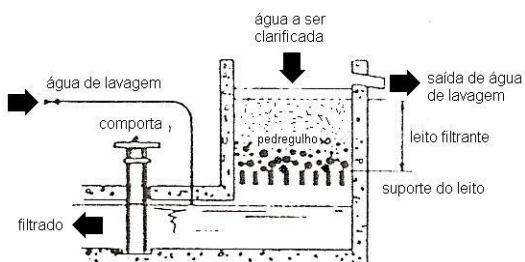
c) Filtração

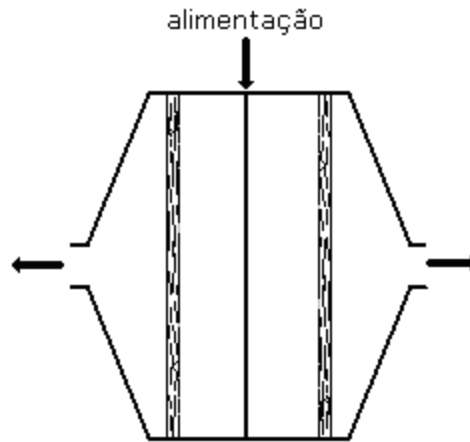
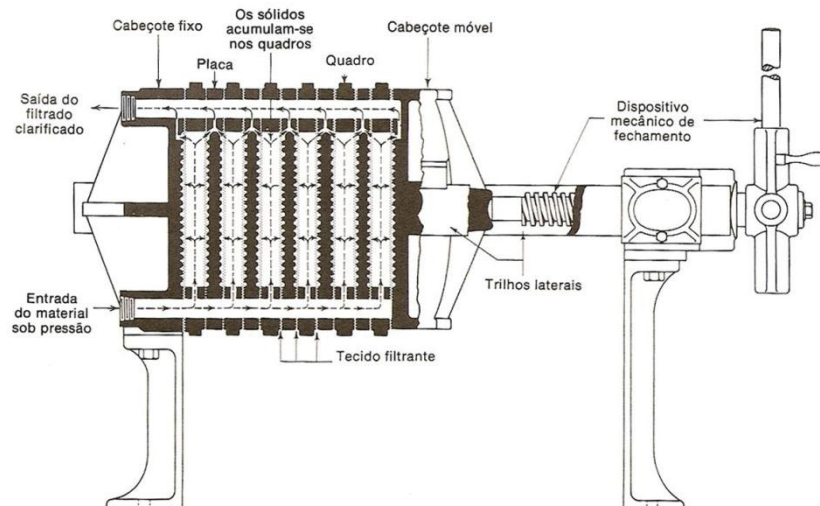
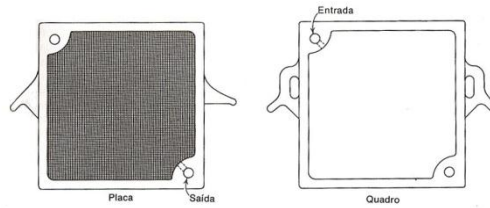
Filtrar consiste em separar mecanicamente as partículas de uma suspensão líquida com o auxílio de um leito poroso. Quando se força a suspensão através do leito, o sólido fica retido formando um depósito conhecido como torta, cuja espessura vai aumentando no decurso da operação.

O campo de atuação da filtração se confunde com a decantação, centrifugação e prensagem. Pode ser usada com sucesso quando se deseja (1) separar sólidos relativamente puros de suspensões diluídas, (2) uma clarificação total de produtos líquidos com poucos sólidos e (3) a eliminação total do líquido de uma lama espessada.

O princípio de funcionamento de um filtro pode ser representado pelo desenho abaixo:

O meio filtrante pode ser leitos rígidos, telas metálicas, tecidos e membranas semi-permeáveis.

Os filtros mais utilizados na indústria para a separação de suspensões são:

- *Leito poroso granular* (fig. 14.9): o modelo mais simples é uma caixa com fundo perfurado, sobre o qual é colocado um leito poroso granular geralmente pedregoso e arenoso.

Figuras 14.9 – Filtro de leito poroso

- *Filtro-prensa*: o princípio de funcionamento deste equipamento pode ser entendido com base nas operações de funis de Buchner de laboratório (Fig. 14.10). Se dois destes funis forem unidos pelas bordas e a suspensão alimentada na câmara formada entre eles, a filtração será realizada através do dois elementos. No filtro-prensa várias câmaras são justapostas e em geral não se utiliza vácuo mas pressão na suspensão. Um filtro-prensa é fornecido sob a forma de uma série de placas (Fig. 14.11) que são apertadas firmemente uma nas outras, com uma lona filtrante em cada lado de cada placa (Fig. 14.12).

Figuras 14.10 – Dois funis buchner

Figuras 14.11 – Filtro prensa

Figuras 14.12 - As placas do filtro prensa

- *Filtro rotativo contínuo (filtro Oliver):* consta de um tambor cilíndrico que gira em baixa rotação, de 0,1 a 2 rpm, parcilamente imerso na suspensão a filtrar, geramente operando com vácuo (Fig. 14.13).

Figuras 14.13 – Filtro rotativo

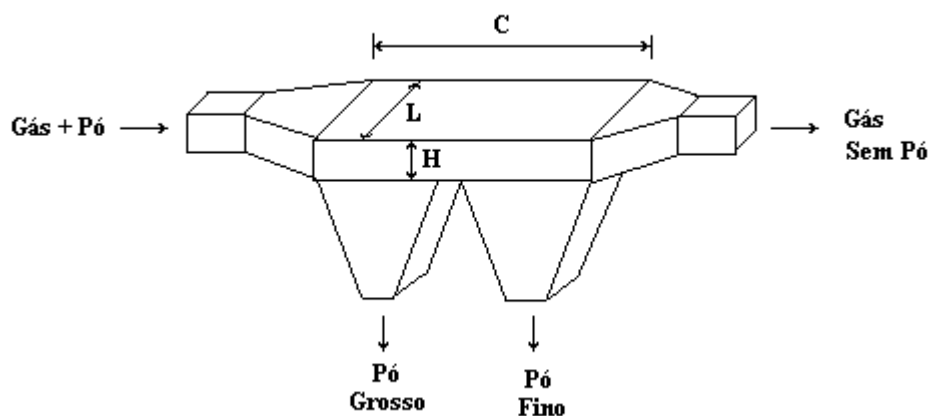
14.3 – Separação de sólidos e líquidos de gases

A importância industrial da remoção de partículas sólidas e gotículas suspensas em gases tem várias origens:

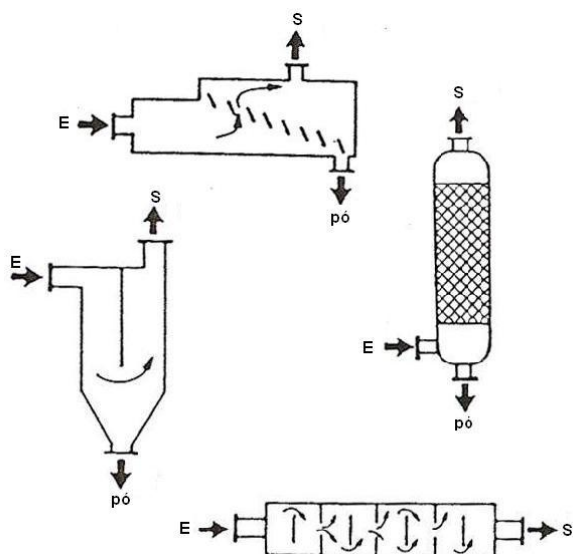
- Separar materiais arrastados evitando perdas;
- Efetuar a limpeza de gases e vapores obtidos em diversos processos industriais;
- Evitar poluição e
- Por razões de segurança.

a) Câmaras gravitacionais (Fig. 14.14)

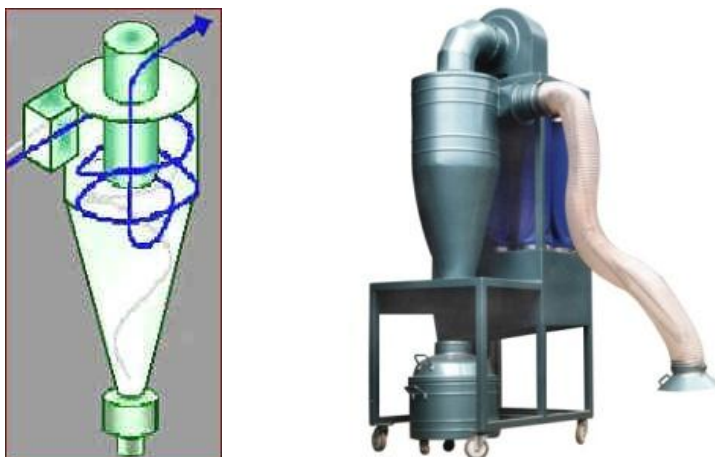
São simples expansões dos dutos onde escoa a corrente gasosa, sendo bem eficiente para partículas grosseiras. A seção transversal da câmara deve ser suficientemente grande para

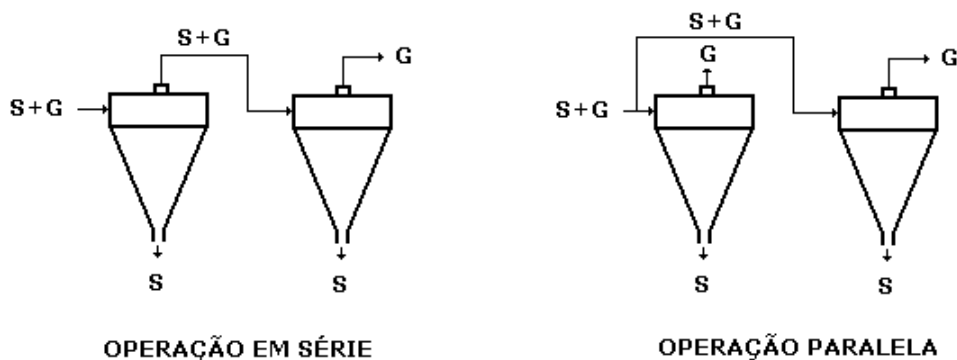
que a velocidade se torne pequena de forma que a força gravimétrica supere a cinética, o que leva à deposição e conseqüente separação das partículas da corrente gasosa.

Figuras 14.14 – Câmara gravitacional

b) Separação inercial ou de impacto (Fig. 14.15)

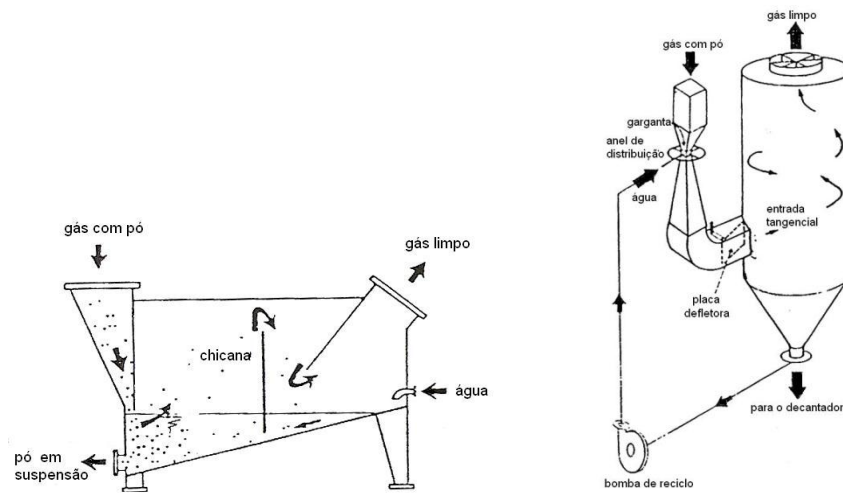
O princípio da separação se dá pela diferença bastante grande entre as quantidades de movimento das partículas ou gotículas do gás. O fluxo é obrigado a passar por anteparos como chicanas ou material poroso de enchimento. A remoção de fumaças ou neblinas da corrente gasosa depende geralmente do impacto destas em barreiras colocadas perpendicularmente à direção do fluxo. Todas as partículas ou gotículas que se deslocam no interior do tubo incidem nas barreiras e são removidas, enquanto que as demais não. A eficiência desta remoção pode ser aumentada recobrindo as chicanas com óleo ou água.

Figuras 14.15 – Quatro tipos de separadores inerciais

c) Separadores centrífugos (ciclones) (Fig. 14.16)

São equipamentos que separam partículas de um gás. Fluxo gasoso entra no ciclone por uma abertura lateral, saindo por cima o gás purificado e as partículas pela parte inferior do equipamento.

Figuras 14.16 – Ciclone: esquema e equipamento

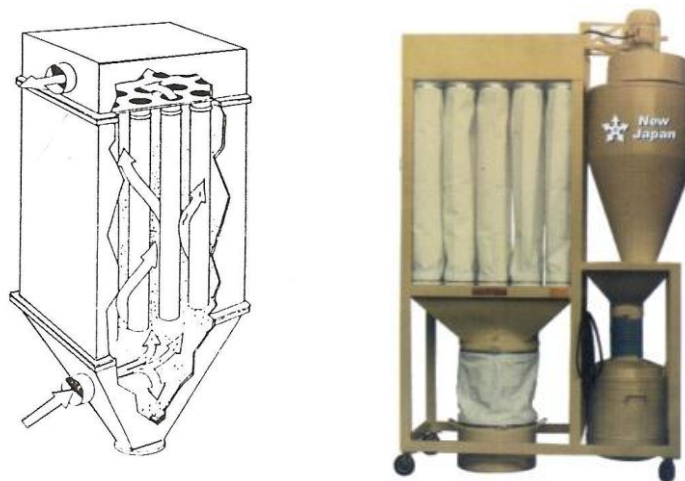
As partículas sólidas chocam-se contra a parede do ciclone onde perdem velocidade e precipitam. Os fatores que influenciam o funcionamento de um ciclone são o diâmetro da partícula, a velocidade de entrada do gás a tratar e a viscosidade do gás. Os ciclones podem ser ligados em série ou em paralelo.

d) Coletores úmidos (Fig. 14.17)

Constituem a categoria mais recente de coletores de partículas, podendo ser empregadas para diâmetros médios de 1 a 10 μm. As partículas incidem em um anteparo úmido onde são coletadas. O líquido geralmente usado é a água, embora óleos minerais podem ser usados.

Existem outras variantes destes equipamentos que são os mais usados na indústria. É importante que os sólidos a separar devem ser molháveis pelo líquido e que não venham produzir um composto corrosivo durante a lavagem.

Figuras 14.17 – Coletores úmidos: inercial e lavador venturi

e) Filtros

São coletores utilizados para a retenção de partículas e gotículas na faixa de 0,1 e 100 μm. Suportam cargas leves de sólidos, apropriado para gases secos e possuem eficiência inferior a 95%, embora precisem de manutenção elevada, ocupam pequeno espaço.

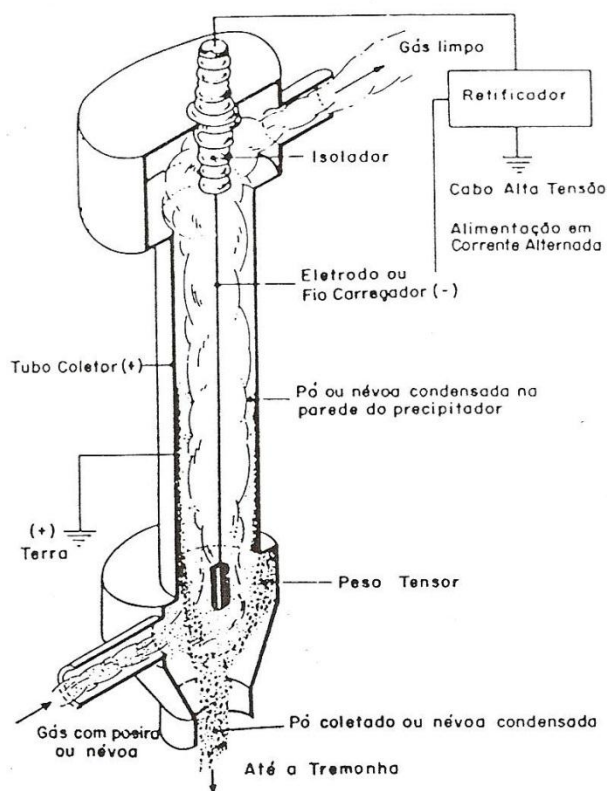
Um dos equipamentos mais comuns na indústria é o chamado *filtro de manga ou de sacos* (Fig. 14.18). Os tecidos são de algodão, lã, feltro, poliéster e outros sintéticos. As mangas com 15 cm de diâmetro por 2,5 1 3 metros de comprimento são penduradas em suportes e as aberturas são presas numa placa perfurada por onde o gás limpo sai. O pó fica retido na parte externa da manga e a sua remoção se dá mecanicamente ou por pulsos de ar comprimido.

Figuras 14.18 – Coletores úmidos: inercial e lavador venturi

f) Precipitadores eletrostáticos (Fig. 14.19)

A precipitação eletrostática é um processo físico segundo o qual partículas contidas num fluxo gasoso são carregadas eletricamente pela ação de um campo elétrico e separadas da corrente gasosa. O sistema consiste em uma superfície coletora carregada positivamente (ligada à terra) colocada próxima a um eletrodo emissor com carga negativa com elevada tensão. A elevada tensão acarreta a formação de íons gasosos positivos e negativos que se movimentam em direção aos eletrodos de carga oposta. Na medida que as partículas de poeira contidas no gás atravessam o equipamento, elas colidem com os íons negativos e também se tornam negativas, dirigindo-se, portanto, para a parede de potencial positivo igual à terra e ali se prendem.

Os precipitadores eletrostáticos podem operar a seco ou a úmido, este último é ideal para a remoção de névoas ácidas. Eles operam de forma similar, porém o úmido possui nebulizadores ou aspersores de água que lavam as superfícies coletoras.

Principais características:

- a alta eficiência de coleta, de 95 a 99%, para partículas de 0,1 e 100 μm;
- reduzidos custos de operação e manutenção;
- útil para grandes vazões e
- opera com tensões de 7000 a 30000 volts.

Figuras 14.18 – Precipitador eletrostático

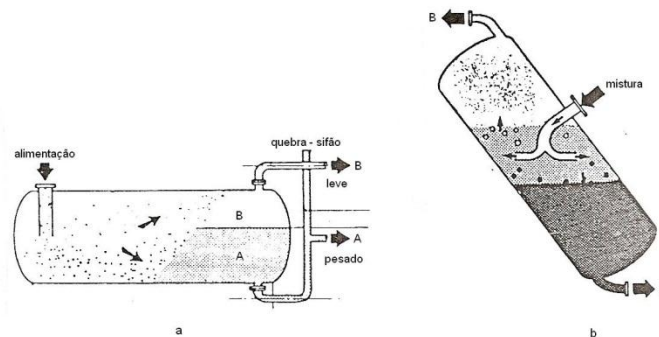
14.4 – Separação mecânica de líquidos

A separação de líquidos imiscíveis em escala industrial é importante nas seguintes situações:

- certos produtos líquidos são obtidos com impurezas líquidas imiscíveis;
- a condensação de vapores muitas vezes dá origem a uma mistura heterogênea de líquidos;
- certos resíduos industriais apresentam uma fase aquosa e uma fase oleosa imiscíveis;
- certas suspensões naturais de líquido em líquido devem ser separadas.

Há dois tipos de equipamentos que efetuam separações mecânicas de líquidos imiscíveis: os decantadores e as centrífugas, estas últimas já citadas.

Os decantadores (Fig. 14.19) são utilizados quando a separação é fácil, ou seja, além de não estarem emulsionados, os líquidos apresentam densidades diferentes e as gotículas do líquido disperso são suficientemente grandes para garantir uma velocidade de decantação razoável. O decantador de líquidos mais usado é um tanque na horizontal de seção suficientemente grande para permitir o escoamento da mistura a baixa velocidade, 7 a 30 cm/min, de modo a facilitar a decantação. A mistura é alimentada mais ou menos no eixo do vaso, se separando em duas fases, a mais pesada sai pelo fundo e a mais leve pela parte superior. As alturas dos líquidos devem ser bem dimensionadas em função de suas densidades para que haja fluxo proporcional.

Uma variante desse decantador é o tanque cilíndrico inclinado, chamado Edeleanu, onde a alimentação é feita no centro do tanque, formando duas fases que são retiradas pelas extremidades.

Figuras 14.18 – Decantadores de líquidos: a) horizontal e b) vertical

14 – TRANSPORTE DE SÓLIDOS

Os sólidos podem ser transportados de diversas maneiras e são classi9ficados segundo elas:

14.1 – Carregadores

a) Transportador de correia (Fig. 14.19)

Consiste de uma correia sem fim que se movimenta entre um tambor livre e outro tambor de acionamento, a alimentação e a descarga ocorrem nas extremidades.

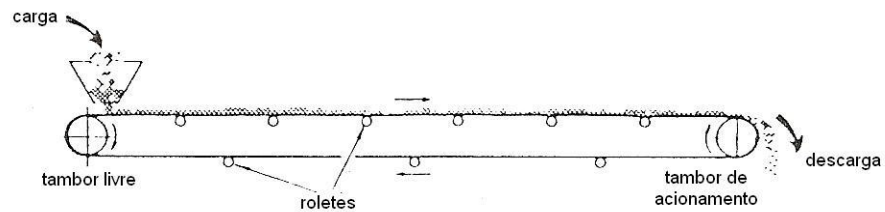



Figura 14.19 – Transportador de correia

b) Transportador de esteira (Fig. 14.20)

É um modelo similar ao de correia, aplicável ao transporte pesado de materiais. Operam em baixas velocidades e suas esteira geralmente são metálicas.

Figura 14.20 – Transportador de esteira

b) Transportador de caçamba (Fig. 14.21)

É empregado para grandes distâncias. As caçambas móveis são suspensas em cabos de aço ou em eixos com roletes nas duas extremidades, se movimentam em trilhos e a descarga é feita pela inversão das caçambas.

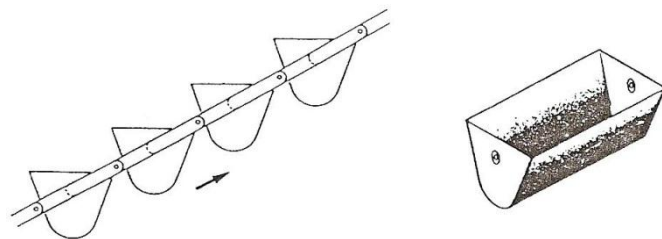



Figura 14.21 – Transportador de caçamba

d) Transporte vibratório (Fig. 14.22)

Utilizado para movimentar sólidos densos e de escoamento fácil. O equipamento vibra pela ação de eixos excêntricos ou vibração eletromagnética, o que faz as partículas "pularem" sobre a calha.

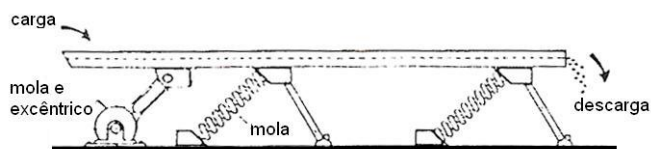



Figura 14.22 – Transportador vibratório

e) Transporte por gravidade

O sólido escoa por gravidade sobre um plano inclinado.

14.2 – Arrastadores

a) Transporte de calhas (Fig. 14.23)

É o mais simples e o mais barato dos transportadores, fabricado em madeira ou aço, no interior do qual movimentam-se raspadeiras que arrastam consigo o sólido a transportar.

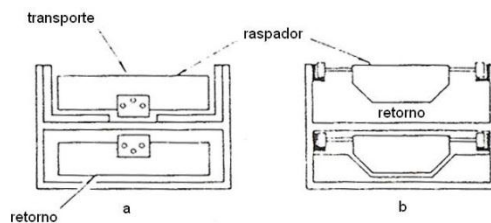



Figura 14.23 – Dois tipos de transportadores de calhas

b) Transporte helicoidal (Fig. 14.24)

Utilizado para pequenas distâncias, serve simultaneamente para operações de lavagem, mistura, cristalização, resfriamento, extração e secagem. Consta de uma canaleta de seção semi-circular no interior da qual gira um eixo com um helicóide.

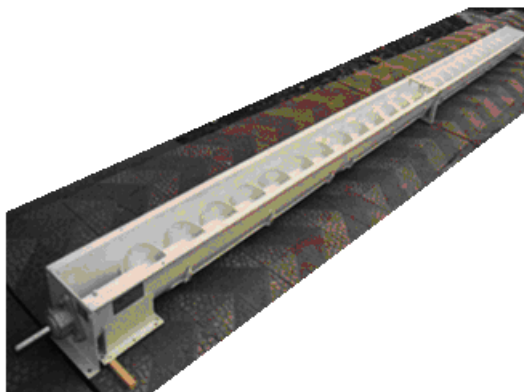



Figura 14.24 – Transportador helicoidal

14.3 – Elevadores

a) Elevador helicoidal

Idêntico ao mencionado na seção anterior, porém um tubo cilíndrico vertical substitui a calha semi-circular.

b) Elevador de canecas (Fig. 14.25)

São construídos com canaletas fixas sobre correias verticais de grande inclinação ou em correntes que se movimentam entre uma polia ou roda dentada motora superior e outra inferior que gira livremente.

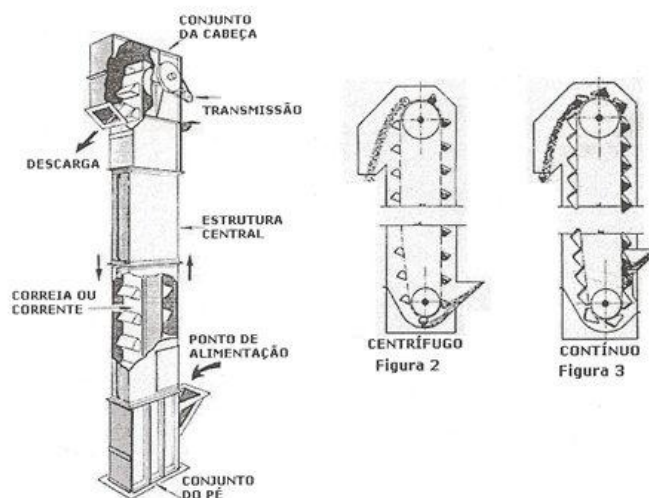



Figura 14.25 – Transportador de canecas

14.4 – Alimentadores

a) Alimentador de válvula rotativa (Fig. 14.26)

Possui um eixo que gira em velocidade constante movimentando palhetas em número variável de 4 e 8. A vazão pode variar pela simples alteração da rotação.

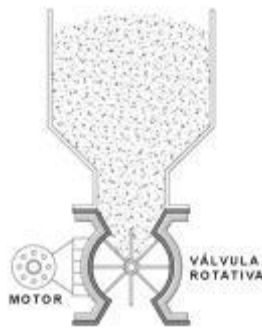



Figura 14.26 – Alimentador de válvula rotativa

b) Alimentador de comporta e contra-peso (Fig. 14.27)

È composta por uma comporta de entrada que suporta um determinado peso. Acima deste peso, a comporta abre-se e o material é descarregado.

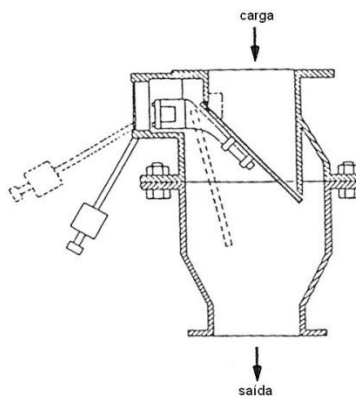



Figura 14.27 – Alimentador de comporta e contra-peso

14.5 – Transporte pneumático (Fig. 14.28)

O princípio básico é a fluidização dos sólidos, isto é, o leito de partículas é capaz de assumir, pela ação de uma corrente de gás, normalmente ar ou gás inerte, um estado em que

o conjunto se assemelhe a um fluido. A mistura sólido-gás assim formada escoa pelo interior dos dutos do sistema.

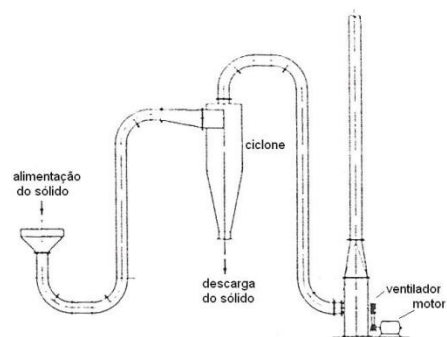



Figura 14.28 – Transportador pneumático

15 – EXPULSÃO DE LÍQUIDOS

A expulsão é o último estágio na desidratação de sólidos compressíveis. É usada para extrair o líquido remanescente antes do sólido ser termicamente seco ou sofrer extração química líquida. O objetivo é remover o máximo de líquido. O custo operacional da expulsão é muito menor que os métodos que utilizam calor ou solvente.

Prensas são usadas para a extração de óleos e líquidos, geralmente a partir de sementes e frutas, como o amendoim e as olivas. As prensas mais antigas necessitavam de descarregamento manual e limpeza entre prensagens. As prensas contínuas atuais operam de forma contínua sem que seja necessária a atuação direta de um operador.

Os principais tipos de prensas são:

- *Prensa parafuso*: é uma prensa de rotação que aperta a polpa e expulsa o líquido. Usada para a extração de óleo de sementes, citros, polpa e grãos.
- *Prensa de disco*: utiliza dois discos, serve para grãos, café e para silagem.
- *Prensa de rolos*: dois cilindros amassam a polpa.
- *Prensa de correias*: operam semelhante aos filtros.

Uma forma de otimizar o processo de extração é agregar à massa uma *carga de corpo* que providencie uma rede de poros e alguma resistência durante o ciclo de prensagem. Usa-se para isto casca de arroz, serragem, bagaço e cinzas em um volume que pode varia de 10 a 50 %.

A figura 15.1 mostra dois exemplos de prensas.

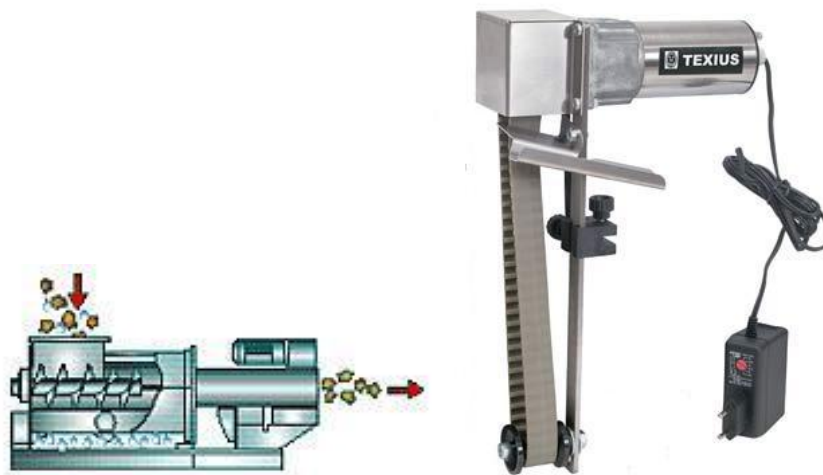



Figura 15.1 – Prensas para extração de líquidos: parafuso e de correia

16 - PSICROMETRIA

A psicrometria se preocupa com a determinação das propriedades das misturas líquido-vapor. O sistema água-vapor é de longe o mais comumente usado. Alguns conceitos:

- *Umidade absoluta:* é a massa de vapor d'água dividida pela massa de ar seco em um volume de ar a uma temperatura específica. Quanto mais quente o ar, mais água ele comporta.
- *Umidade relativa:* é a razão entre a umidade absoluta atual e a maior umidade absoluta possível (que depende da temperatura atual do ar). Quando os instrumentos indicam umidade relativa de 100%, isso quer dizer que o ar está totalmente saturado com vapor d'água e não pode conter nem um pouco a mais, criando a possibilidade de chuva. Mas isso não significa que a umidade relativa deva ser de 100% para que chova - basta que seja 100% onde as nuvens estão se formando. Enquanto isso, a umidade relativa próxima ao solo pode ser muito menor.
- *Ponto de orvalho:* O vapor de água se condensa no ponto de orvalho**.** Quando se coloca água gelada num copo no verão, o ar próximo ao copo se esfria e fica saturado, de modo que o vapor de água se condensa no copo como *orvalho. A temperatura em que o ar fica saturado chama-se ponto de orvalho.* No inverno rigoroso, ao ar livre, o ar que se expira é tão úmido que, esfriando-se bastante, pode ficar abaixo do ponto de orvalho, então se condensa formando uma névoa. Uma forma caseira de determinar o ponto de orvalho é colocar água e um termômetro numa vasilha polida de metal, adicionar aos poucos água gelada, agitando-a, a temperatura observada quando começar a formar orvalho na superfície, é o ponto de orvalho para a temperatura ambiente.
- *Temperatura de bulbo seco*: é a temperatura medida por um termômetro comum, não leva em conta a umidade do ar.
- *Temperatura de bulbo úmido*: é a temperatura mais baixa que pode atingir o ar úmido quando este é resfriado apenas pela evaporação da água.

Vários métodos podem ser usados para a medição de umidade (*U*). Provavelmente o método mais usado para a determinação da umidade relativa do ar é a medição das temperaturas de bulbo seco e bulbo úmido (Fig. 16.1a). A temperatura de bulbo úmido (T_U) é feita pelo contato do ar com um termômetro cujo bulbo está coberto com um pavio saturado com água. A temperatura de bulbo seco (*T*) é medida por um termômetro normal. A equação abaixo calcula a *U*:

$$U = \left(1 - 3\,\frac{T - Tu}{T + 18}\right) \times 100$$

válida para temperaturas entre -7 e 60°C e umidades entre 30 e 70%

A Fig. 16.1b mostra um higrômetro portátil, de medida rápida, promove a vaporização pelo giro do suporte.

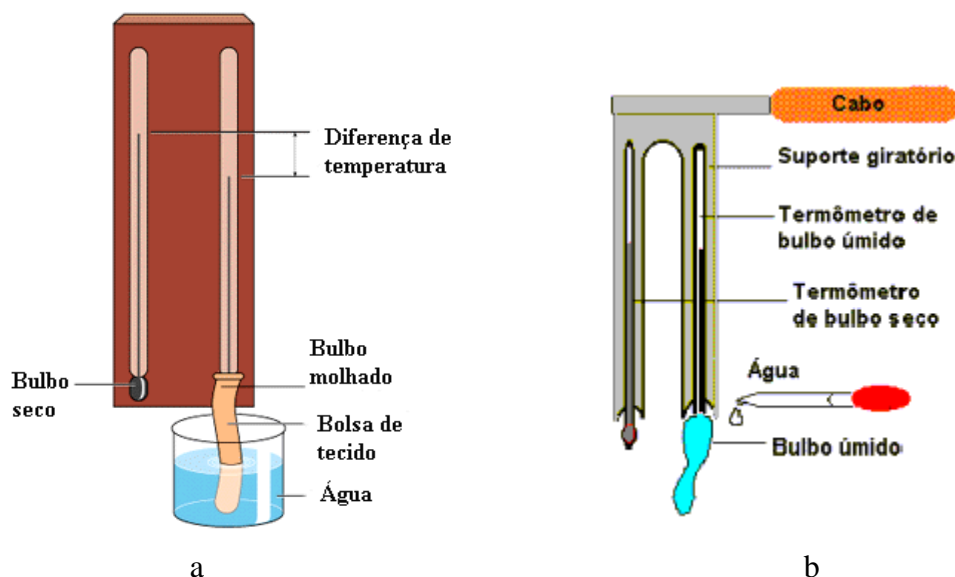



Figura 16.1 – Higrômetros: a) de parede e b) portátil.

Os aparelhos para a medição de umidade do ar são chamados de higrômetros, os três tipos usados, além do citado acima, são:

- *Higrômetro mecânico*: matérias como cabelo humano, fibra de madeira e plásticos têm sido usados como medidores de umidade. O que caracteriza o uso destes materiais é a variação de suas dimensões com a umidade.

- *Higrômetro elétrico*: mede a resistência elétrica de um filme de material absorvente de umidade exposto ao gás.

- *Higrômetro gravimétrico*: neste método uma quantidade conhecida de gás é passada através de um produto químico absorvente de umidade, tal como o pentóxido de fósforo e o aumento do peso é medido. È o método aceito como o mais preciso.

16.1 – Resfriamento evaporativo

O processo de resfriamento de água é de conhecimento dos mais antigos. Alguns dos prodessos são lentos, como o resfriamento da água sobre a superfície de um tanque, outros são comparativamente mais rápidos como a atomização da água no ar. Esses processos todos envolvem a exposição da superfície da água ao ar em diferentes graus.

O processo envolve a transferência de calor latente para a vaporização de pequenas porções de água e de calor sensível pela diferença de temperaturas do ar e da água. A remoção de calor pelo ar circulante em uma torre de refrigeração depende da temperatura e da umidade do ar . Uma indicação da umidade do ar é a sua temperatura de bulbo úmido e esta é teoricamente a temperatura mais baixa que a água pode ser reduzida pelo ar, na prática esta nunca é alcançada, pois é impossível o contato total da água com o ar fresco. A magnitude

desta aproximação depende da qualidade do projeto da torre de resfriamento, na prática op valor a ser alcançado na diferença de temperaturas do ar e da água é de 2,8°C.

As indústrias utilizam circulação de água para reduzir a temperatura de fluidos. Usa-se para isso trocadores de calor com água de refrigeração, esta faz parte de um circuito fechado que, num primeiro momento, é aquecida pela troca térmica com um fluido quente, e depois segue para a torre de refrigeração, Fig. 16.2. O processo de resfriamento, como se sabe, evapora uma pequena parte da água, que é resposta. A Fig. 16.3 mostra outros dois tipos de torres de refrigeração, que em termos de capacidade, são os extremos em tamanho.

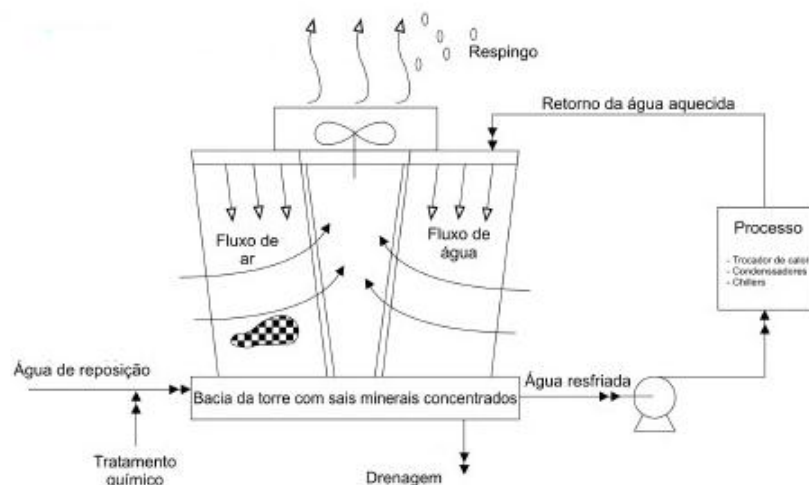



Figura 16.2 – Esquema de uma torre de refrigeração

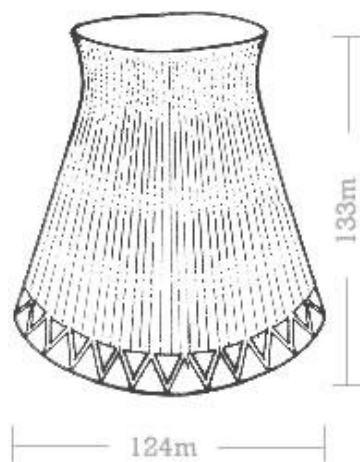



Figura 16.3 –Torres de refrigeração: a) de pequeno porte e b) hiperbólica, de grande porte

16.2 – Umidificação

A forma mais simples de umidificação é o da câmara de nebulização (Fig. 16.4). Nesta câmara o líquido é dispersado na forma de névoa grossa na corrente do gás. A velocidade do gás é mantida baixa de modo que o tempo de contato seja maior e pequena seja a quantidade de líquido arrastada pelo gás. Um exemplo é o depurador de fumaça, onde o contato íntimo entre as correntes do gás e do líquido é assegurado pelo uso de bocais de estrangulamento, cuja função é atomizar a água. O amplo espaço permite a separação das fases. Os depuradores de fumaças são muito usados para a remoção de poeiras e partículas de uma corrente gasosa ou para efetuar a reação de um líquido com um componentes da fase gasosa. Servem também para a remoção de um componente condensável presente na fase gasosa.

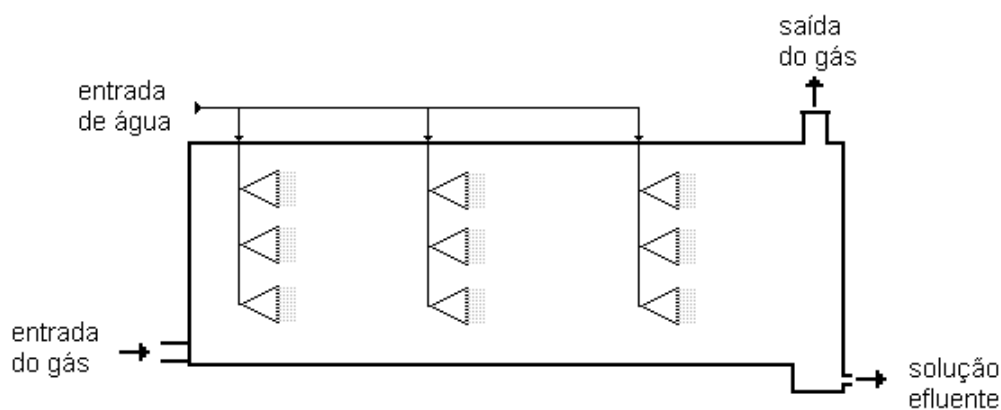
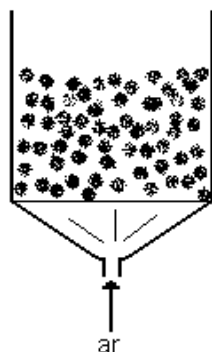
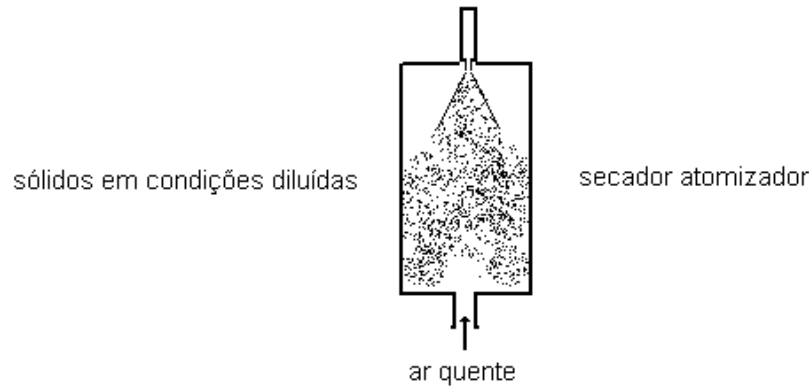



Figura 16.4 –Câmara de bebulização

17 – SECAGEM DE SÓLIDOS

A secagem é uma separação total ou parcial do líquido contido em um determinado sólido usando-se processos térmicos. Em geral, o líquido a se retirar é a água. A secagem difere da evaporação em termos de volume de líquido retido, neste último o volume percentual é maior.

Normalmente, a secagem de um sólido significa a remoção de quantidades relativamente pequenas de água ou outro líquido do material sólido, reduzindo o conteúdo de líquido residual a valores baixos aceitáveis. A água ou outros líquidos podem ser removidos dos sólidos mecanicamente por prensas ou centrífugas, como se viu em seções anteriores, ou termicamente por vaporização.

Em equipamentos de contato gás-sólido, os leitos dos sólidos podem ser estáticos, móveis ou fluidizados. No primeiro caso, as partículas sólidas não têm movimentos relativos umas com as outras, permanecendo o leito estático. O leito de partículas pode ser levemente expandido, no qual as partículas são separadas o bastante para haver fluxo, isto ocorre pela agitação mecânica ou força gravitacional. No leito fluidizado, as partículas sólidas são suspensas por um fluxo de arraste causado por um gás ascendente; as partículas sobem e caem continuamente, a fase sólida e a fase gasosa se misturam e juntas adquirem um comportamento similar a um líquido fervente.

Uma condição expandida, na qual as partículas sólidas são inteiramente separadas e totalmente dispersas no gás, é aquela em que a velocidade do gás em todos os pontos do sistema excede a velocidade de precipitação das partículas sólidas.

Os principais tipos de secadores industriais são:

a) Secador de bandejas (Fig. 17.1)

É o tipo mais comum de secadores, basicamente, é uma câmara onde o material a ser seco é colocado em bandejas ou tabuleiros. É uma unidade de operação descontínua usada para operação de pequena escala. O aquecimento se faz normalmente por sistema elétrico, a injeção ou a aspiração de ar ocorre por ventilação.

Figura 17.1 – Secador de bandejas

b) Secador de tambor (Fig.17.2)

As lamas e as pastas podem ser continuamente secadas em secadores de tambor, desde que o produto seco não seja duro nem arenoso demais para danificar a superfície do tambor. Pode ser um único cilindro ou duplo, o material a ser ceco é borrifado contra o cilindro

continuamente. Tanto a espessura da camada formada, como a velocidade do giro são reguláveis de modo que o material siga no seu trajeto entre a alimentação e o raspador.

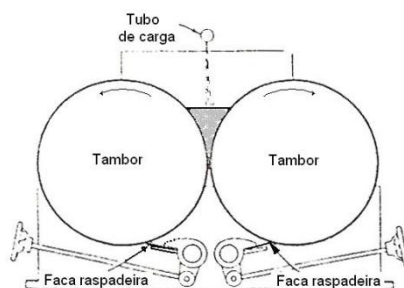



Figura 17.2 – Secador de tambor

c) Secador rotatório (Fig. 17.3)

É composto de um cilindro oco que gira em uma posição levemente inclinada sobre a horizontal. O material é revolvido dentro do cilindro e a calefação pode ser direta no interior ou indireta pelo aquecimento do cilindro.

Figura 17.3 – Secador rotatório

d) Secador pulverizador (Fig. 17.4)

Estes tipos de secadores utilizam cargas bombeáveis (soluções, suspensões, emulsões, etc.), misturas, portanto, onde existe uma maior quantidade de líquido. A figura mostra uma instalação típica, onde o ar injetado através de um filtro e de um aquecedor, penetra pelo topo da torre de secagem, fluindo em corrente paralela com as gotículas pulverizadas. Na medida que as partículas atomizadas caem, a umidade evapora no gás quente e deixa o material sólido particulado. As maiores caem até o fundo da câmara e as menores são arrastadas pelo gás até os ciclones separadores. As muito finas passam pelo soprador e entram em um sistema de lavagem. Este tipo de secagem é utilizada para a produção de leite em pó, café solúvel, detergente em pó e na indústria farmacêntica.

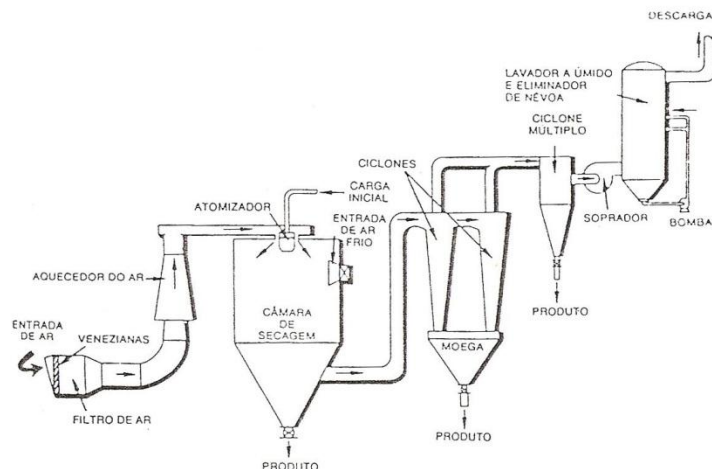



Figura 17.4– Secador pulverizador

e) Secador de leito fluidizado (Fig. 17.5)

Esta secagem é baseada em um sistema contínuo onde o material a ser desidratado é colocado em uma esteira perfurada que recebe ar quente pela parte inferior. Isto faz com que a carga adquira movimento similar a um líquido em ebulição.

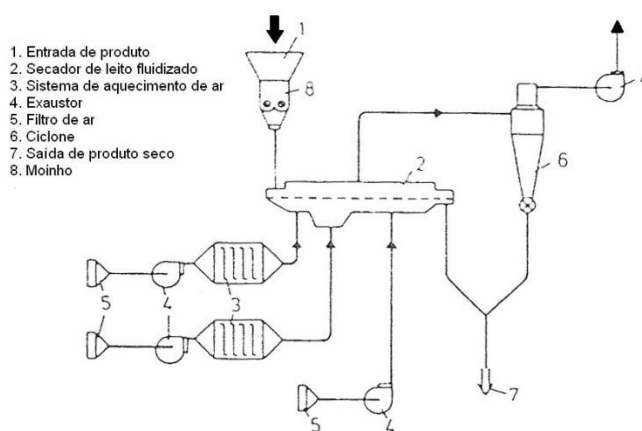



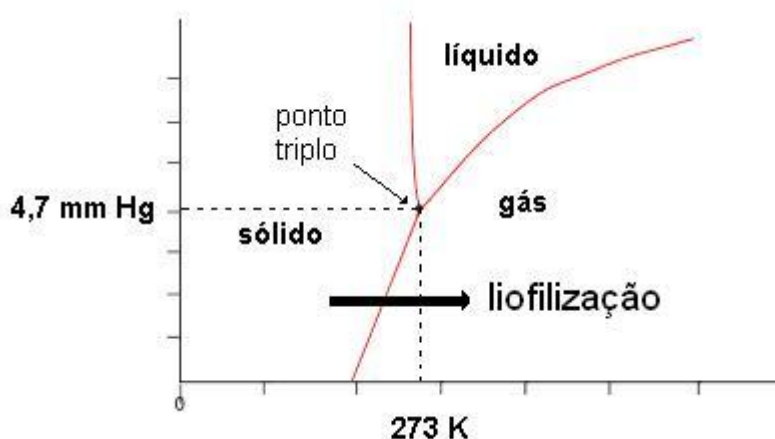
Figura 17.5 – Secador de leito fluidizado

f) Secador túnel

O secador de bandejas pode tornar-se contínuo pelo deslocamento dos sólidos úmidos através da câmara de secagem. Esta operação pode ser realizada seja pela montagem das bandejas sobre vagonetes, seja pelo transporte do material em esteiras transportadoras. O fluxo de ar poder ser transversal, paralelo ou contracorrente. As principais vantagens são a flexibilidade, alta produção e condições mais controladas.

g) Liofilização

É um processo de desidratação de produtos, também conhecido como criosecagem. O processo ocorre em condições de pressão e temperatura tais que, a água previamente congelada, passa do estado sólido diretamente para o estado gasoso, mudança de fase chamada de sublimação. Como a temperatura é baixa e o ar está ausente devido ao vácuo, as condições químicas e organolépticas não são alteradas.

O fundamento da liofilização, conforme o diagrama abaixo, consiste em operar em temperatura e pressão mais baixas que o ponto triplo da água, região na qual a fase líquida deixa de existir e a água passa diretamente da fase sólida para a fase gasosa, e vice-versa, dependendo das condições.

Os liofilizadores industriais podem ser descontínuos ou semi-contínuos. Normalmente, o produto congelado a -40°C é conduzido para a câmara de alto vácuo onde o aumento de temperatura acelerará a sublimação da água. As principais vantagens do processo de liofilização são a manutenção das propriedades organolépticas (cor, sabor e aroma) do alimento e a retenção de maiores teores de vitaminas. Sua grande desvantagem é o custp, de cinco a dez vezes maior que os processos tradicionais.

18 – EVAPORAÇÃO E CRISTALIZAÇÃO

18.1 – Evaporação

O evaporador é um equipamento que tem a função de reduzir a quantidade de líquido, normalmente água, contida em um determinado produto. Sua utilização mais extensiva acontece na indústria alimentícia, consistindo na operação de remoção da água existente nos alimentos in natura, pois todo alimento contém água natural em sua composição.

Para a evaporação, usa-se transferência de calor para ferver o alimento, e obter um produto aquoso de concentração mais elevada. Este processo é utilizado para retirada da água dos alimentos mais variados como:

- Fabricação de leite condensado.
- Sucos de frutas concentrado (laranja, abacaxi, uva, etc).
- Extrato e Catchup de tomate.
- Polpas de frutas (banana, morango, manga, etc).
- Doces em massas (goiabada, marmelada, batata doce, etc).

O evaporador tem a função principal de fornecer calor para evaporar a água do alimento (troca térmica), através da ebulição. Para que o alimento não perca a sua cor, aromas e ingredientes nutritivos, esta operação de fervura é realizada sob vácuo no interior do evaporador isto é, o alimento entra em ebulição a baixa temperatura. Alguns fatores são importante na evaporação da água do alimento e que, deve ser observado:

- *Viscosidade do Produto Alimentício:* quanto mais concentrado o produto mais viscoso ele fica, até um ponto em que a troca térmica não é mais possível.

- *Pressão no Evaporador*: a temperatura do produto no interior do evaporador é função da pressão interna ou seja, a temperatura do vapor é igual a temperatura de saturação na mesma pressão.

- *Vácuo Interno*: aumentando o vácuo interno no evaporador, aumenta a troca térmica no alimento e evita a degradação do mesmo como: perda de sabor, aromas, cor e nutrientes.

Os evaporadores podem ser utilizados num único efeito (Fig. 18.1) ou multi-efeito (Fig. 18.2):

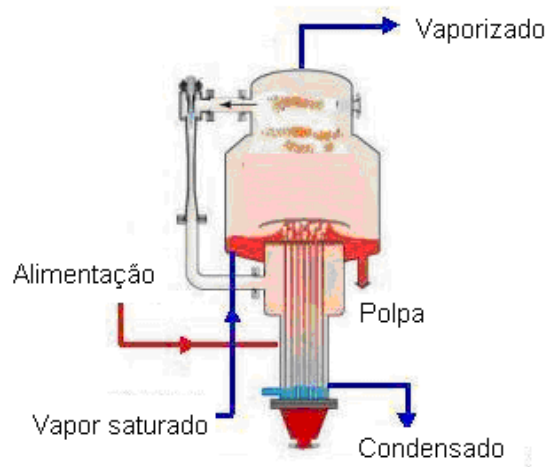



Figura 18.1 – Evaporador de único efeito

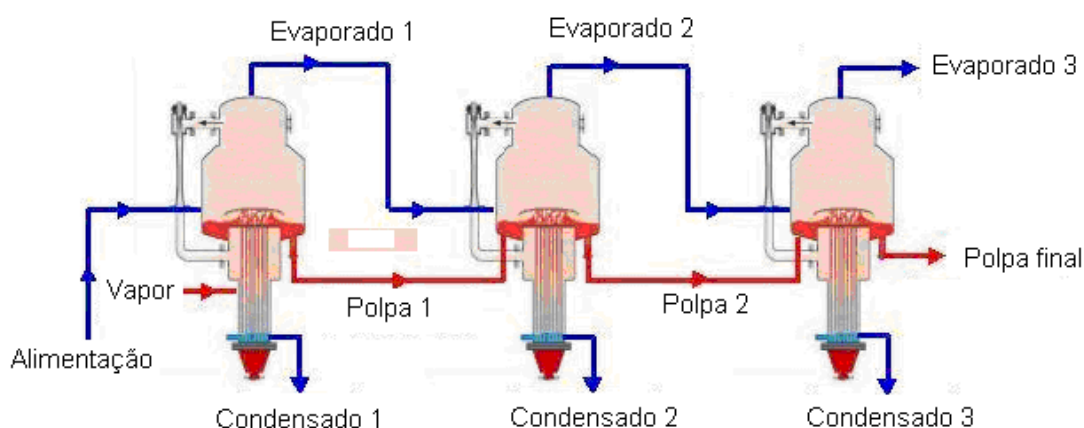



Figura 18.1 – Evaporador de multi-efeito

18.2 – Cristalização

A cristalização é um processo industrial cuja importância está na produção de materiais que podem ser feitos a partir de cristais. Seu amplo uso vem do fato de que um sólido pode ser obtido, em forma altamente pura e atrativa, a partir de uma solução relativamente pura em um processo de uma única etapa. O consumo de energia que o processo de cristalização requer é muito menor que aquele da destilação ou de outros processos de purificação. Além do fato de operar em temperaturas mais baixas e serem construídos em qualquer escala de produção.

Essa técnica continua sendo o procedimento mais adequado para a purificação de substâncias sólidas. Quando a temperatura de uma solução é abaixada, o excesso de sólido se separa da solução constituindo formas geométricas regulares chamadas cristais.

A ciência responsável pelo estudo dos cristais é a cristalografia. A forma dos cristais depende da natureza das substâncias. Os cristais perfeitos têm superfícies planas que se encontram em ângulos definidos e cujas arestas são linhas retas. Geralmente, um crescimento lento em soluções saturadas favorece a formação de cristais grandes, ao passo que os cristais que se formam rapidamente acabam tendo dimensões bem pequenas.

A maioria das aplicações industriais envolve a operação de cristalização a partir de soluções, embora a solidificação de metais é basicamente um processo de cristalização, e muito do que se sabe tem sido desenvolvido em relação à cristalização dos metais.

Um cristal pode ser definido como um sólido composto de átomos arranjados de uma forma ordenada e repetitiva. As distâncias interatômicas em um cristal são constantes e características de um dado material. Na maioria dos casos, os processos da cristalização são lentos e duas são as etapas que ocorrem:

- *Nucleação*: é a formação de uma nova fase sólida.
- *Crescimento*: é o aumento de tamanho do núcleo recém formado, com a adição de camada sobre camada de soluto.

Ambos nucleação e crescimento têm como força motriz a supesaturação. Somente numa solução supersaturada podem ocorrer a nucleação e o crescimento de um cristal. A supersaturação significa que a quantidade de soluto presente na solução, também chamada de licor mãe, deve ser igual ou maior à quantidade relativa à concentração de equilíbrio. A nucleação é o nascimento de corpos muito pequenos de uma fase nova dentro de uma fase supersaturada. O crescimento do cristal é um processo difusional, modificando a superfície sólida em que o crescimento ocorre.

A Fig. 18.3 mostra um dos vários equipamentos utilizados no processo de cristalização.

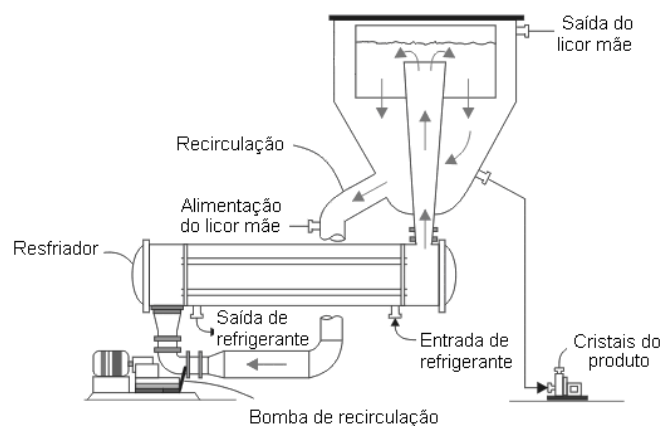



Figura 18.3 – CristalizadorEvaporador de único efeito

Alguns exemplos de produtos cristalinos inorgânicos obtidos pelo processo de cristalização, cujos solventes podem ser a água, etanol, entre outros:

Produto	**Cor e retículo**
K_2CrO_7: cromato de potássio	amarelo e rômbico
K_2Cr_2O7: dicromato de potássio	laranja e triclínico
$K_3[Fe(CN)_6]$: ferricianeto de potássio	vermelho e monoclínico
$CuSO_4.5H_2O$: sulfato cúprico penta-hidratado	azul e triclínico

19 – FENÔMENOS SUPERFICIAS

19.1 – Adsorção

É uma operação de transferência de massa do tipo fluido-sólido na qual se explora a capacidade de certo s sólidos em concentrar em sua superfície determinadas substâncias existentes em soluções líquidas ou em gases.

O fato do soluto ter a capacidade de diminuir a tensão superficial da solução em relação à do solvente puro já faz com que ele possua tendência espontânea de dirigir-se para a superfície da solução, e só esse simples fato já caracteriza o fenômeno de adsorção. Diz-se então que o soluto está sendo adsorvido pela superfície da solução. A adsorção está intimamente ligada à tensão superficial das soluções e a intensidade deste fenômeno depende da temperatura, da natureza e a concentração da substância adsorvida (o adsorbato), da natureza e estado de agregação do adsorvente (o sólido finamente dividido) e do fluido em contato com o adsorvente (o adsortivo).

A adsorção pode ser classificada em adsorção física e adsorção química. *A adsorção física* ocorre normalmente pela atração molecular provocadas pelas forças de Van der Waals. É uma ação rápida e facilmente reversível, pois essa forças de atração intermoleculares são fracas. A *adsorção química, ou quimissorção*, é assim denominada porque neste processo ocorre efetiva troca de elétrons entre o sólido e a molécula adsorvida, ocasionando as seguintes características: formação de uma única camada sobre a superfície sólida, irreversibilidade e liberação de uma quantidade de energia considerável (da ordem de uma reação química).

Sendo a adsorção um fenômeno essencialmente de superfície, para que um adsorvente tenha uma capacidade adsortiva significante, deve apresentar uma grande área superficial específica, o que implica em uma estrutura altamente porosa. As propriedades adsortivas dependem do tamanho dos poros, da distribuição do tamanho dos poros e da natureza da superfície sólida. Os adsorventes mais utilizados em escala industrial atualmente são o carvão ativado, a sílica-gel, a alumina ativada e as peneiras moleculares.

Exemplos mais comuns de tais processos são os chamados processos de purificação, onde se utiliza geralmente uma coluna de leito fixo empacotada com adsorvente para remover umidade de uma corrente gasosa, ou ainda remover impurezas de uma corrente líquida, como por exemplo de um efluente industrial. Quando os componentes a serem adsorvidos estão presentes em baixas concentrações e possuem baixo valor agregado geralmente não são recuperados.

Os chamados adsorventes amorfos – carvão ativado, sílica-gel e alumina – apresentam áreas específicas entre 200-1000m^2/g, e uma faixa de distribuição de tamanho de poros bem ampla, enquanto que as peneiras moleculares, por serem materiais cristalinos apresentam um tamanho de poro de ordem de grandeza molecular definido pela estrutura cristalina, e que praticamente não varia.

- *Sílica-gel* é formada quando um silicato solúvel é neutralizado por ácido sulfúrico, retirando-se a água um sólido poroso é obtido. Sua composição química pode ser expressa como $SiO_2.nH_2O$. Sua principal aplicação industrial como adsorvente é a retirada de umidade de correntes gasosas, mas também foi utilizada na separação de compostos aromáticos de parafínicos e naftênicos no processo Arosorb.

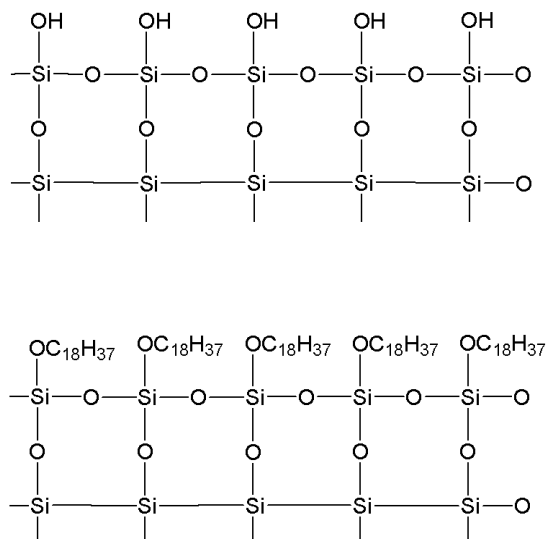



Figura 19.1 – A estrutura da sílica-gel e polímeros da sílica-gel fase reversa

- *Alumina ativada* é constituída de óxido de alumínio e é comumente obtida da bauxita ($Al_2O_3.3H_2O$). Sua aplicação industrial mais importante também é na desidratação de correntes gasosas e em algumas purificações específicas de correntes líquidas.

- *Carvão ativado* é um dos primeiros adsorventes conhecidos e um dos mais utilizados atualmente. Pode ser produzido de várias maneiras e suas características vão depender da matéria prima utilizada e da forma de ativação. Geralmente é produzido pela decomposição térmica de material carbonáceo seguido pela ativação com vapor ou dióxido de carbono em temperaturas elevadas. Sua superfície possui afinidade com substâncias de caráter orgânico, conferindo-lhe sua principal aplicação atualmente, a descontaminação de água destinada ao consumo humano. Utilizando-se de técnicas modernas de ativação é possível produzir um novo material chamado *peneira molecular de carvão* – um carvão ativado com estreita distribuição de tamanho de poros, na faixa observada nas peneiras moleculares. Uma utilização em larga escala destas peneiras moleculares de carvão é na separação de gases. O carvão ativado é utilizado ainda para:

  - Remoção de cloro , odores e matéria orgânica da água tratada.
  - Clarificação de óleos vegetais, óleos minerais, sulfato de alumínio, sulfato de níquel, solventes, rejeitos industriais
  - Eliminação de sabores e cores indesejáveis, impurezas e matéria corante
  - Purificação de ácidos orgânicos
  - Redução da acidez, aldeídos, cetonas e álcoois superiores em bebidas destiladas

- Retenção de gases e vapores
- Tratamento de vinhos e vinagres em geral

- *Peneiras moleculares* normalmente são zeólitas, termos que praticamente eram sinônimos até o surgimento de outros tipos de peneiras moleculares como as alumino fosfatadas e as peneiras moleculares de carvão. Zeólitas são alumino-silicatos de estrutura cristalina e porosa, de ocorrência natural ou sintetizados em laboratório. A estrutura cristalina das zeólitas é formada pela união de tetraedros de SiO_4 e AlO_4 que formam poliedros característicos (Fig. 19.2). Estes poliedros arranjam-se tridimensionalmente dando origem a poros de dimensões moleculares e uniformes, cavidades e canais altamente regulares na escala nanométrica, 0,3 a 10 nm

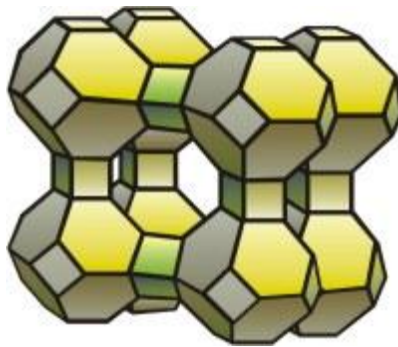



Figura 19.2 – A zeólita

As principais aplicações industriais dos processos de adsorção são:

- Desumidificação de gases;

- Recuperação de vapores de solventes gasosos;

- Remoção de umidade da gasolina;

- Branqueamento de soluções de açúcar e óleo e

- Desodorização de CO_2 de bebidas.

Os processos utilizados são:

- *Percolação*: o adsorvente granulado é mantido fixo sob a forma de um leito poroso através do qual o fluido a ser tratado atravessa.
- *Filtração por contato*: consiste em dispersar o adsorvente finamente dividido no líquido a tratar e promovendo simultaneamente agitação intensa na suspensão, posteriormente faz-se a filtração.

Um dos processos que envolve adsorção de gases em sólidos mais utilizados presentemente é a catálise heterogênea, principalmente a catálise automotiva. Esta é utilizada no tratamento dos gases de exaustão na combustão de veículos automotivos. A Fig. 19.3 mostra esquematicamente um catalisador automotivo.

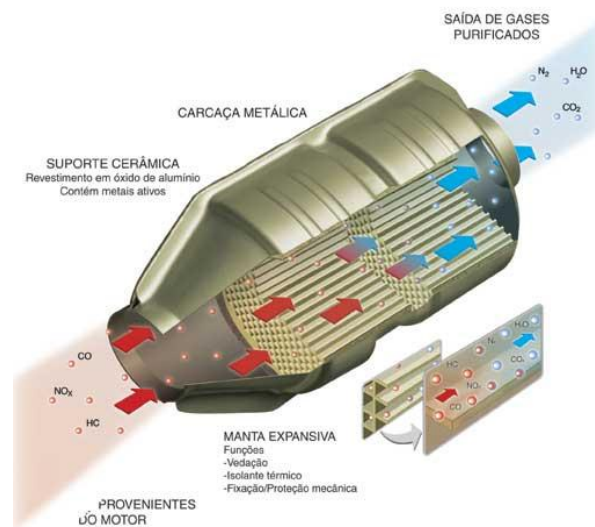
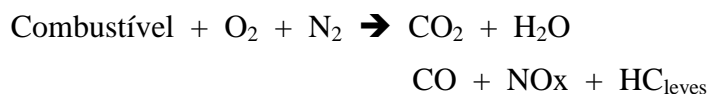
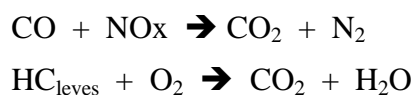



Figura 19.2 – Catalisador automotivo

A reação química que transforma a mistura de combustível e ar nos cilindros dos veículos gera os gases da combustão completa, o CO2 e a H2O, assim como outros gases (todas as reações mostradas abaixo não são estequiométricas):

$$\text{Combustível} + O_2 + N_2 \rightarrow CO_2 + H_2O$$
$$CO + NOx + HC_{leves}$$

Os catalisadores automotivos são estruturas cerâmicas tratadas de forma que possam suportar variações intensas e constantes de temperatura, sem sofrem variações volumétricas. Esta primeira qualidade deste material é obtida pela escolha de um produto cerâmico correto, que não sofra variações de suas dimensões com as alterações da temperatura. Tratamento superficial posterior com alumina faz com que a superfície do cerâmico seja consideravelmente aumentada e sobre ela, num tratamento adequado, sejam adicionados sítios metálicos. Estes metais, principalmente a prata, atraem e adsorvem os gases da reação acima citada, fazendo com que ocorram várias reações:

$$CO + NOx \rightarrow CO_2 + N_2$$
$$HC_{leves} + O_2 \rightarrow CO_2 + H_2O$$

19.2 – Troca iônica

A troca iônica ocorre quando íons presentes em uma solução são trocados por outros íons de um material sólido. Pode-se classificar estes materiais:

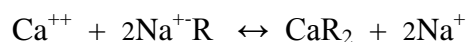
- Por sua natureza: trocadores orgânicos e inorgânicos, podendo ser naturais ou sintéticos.
- Pelo grupo funcional: catódicas, anódicas ou quelantes.

Das resinas orgânicas naturais, a mais conhecida é a celulose, que funciona como trocadora iônica devido aos grupos carboxílicos presentes; das inorgânicas, citam-se as zeolitas, argilas e feldspato. As resinas sintéticas mais usadas são a zeolita artificial, óxidos metálicos hidratados e alguns sais insolúveis.

As resinas catiônicas de ácido forte são feitas a partir do ataque do ácido sulfúrico em polímeros, são as utilizadas para o "amolecimento" da água. As resinas aniônicas são obtidas de aminas e servem para adsorver ácidos fortes.

O princípio de funcionamento da troca iônica entre um sólido portador de íon e uma solução a ser tratada pode ser mostrado através da operação de "amolecimento" da água. A água dura possui uma quantidade relativamente alta de cátions de cálcio e magnésio, que alteram algumas características esperadas da água. Conhecida também como salobra, esta água dificulta a lavagem com sabões, além de ocorrer a precipitação de carbonatos e bicarbonatos de cálcio e de magnésio. Não só devido ao uso caseiro, a água deve ser tratada para o seu uso industrial.

A troca catiônica pode ser pensada como uma reação reversível envolvendo quantidades quimicamente similares:

$$Ca^{++} + 2Na^{+-}R \leftrightarrow CaR_2 + 2Na^{+}$$

Enquanto a água a ser tratada passa pela resina, a reação ocorre da esquerda para a direita, isto é, o cátion cálcio (podendo ser também o magnésio) troca de posição com o cátion sódio, este último passa para a água, onde é solúvel, e o cálcio é preso na resina (R). Com a operação contínua, é evidente que ocorrerá a saturação da resina com cátions cálcio. Para que a regeneração da resina seja feita, a reação agora deverá ser revertida, da direita para esquerda, a resina será tratada por uma solução concentrada de cloreto de sódio, a salmora.

A Fig. 19.3 mostra esquematicamente como os processos de amolecimento da água e regeneração da resina são realizados industrialmente.

As propriedades mais importantes desses trocadores de íons são:

- Sua grande capacidade de troca iônica;
- Estabilidade química e estrutural;

- Boa resistência mecânica;
- Baixa perda de carga e
- Baixo custo.

Além da aplicação em larga escala no tratamento de água, a troca iônica é usada para a deionização de soluções, separação de terras raras e recuperação e separação de fármacos.

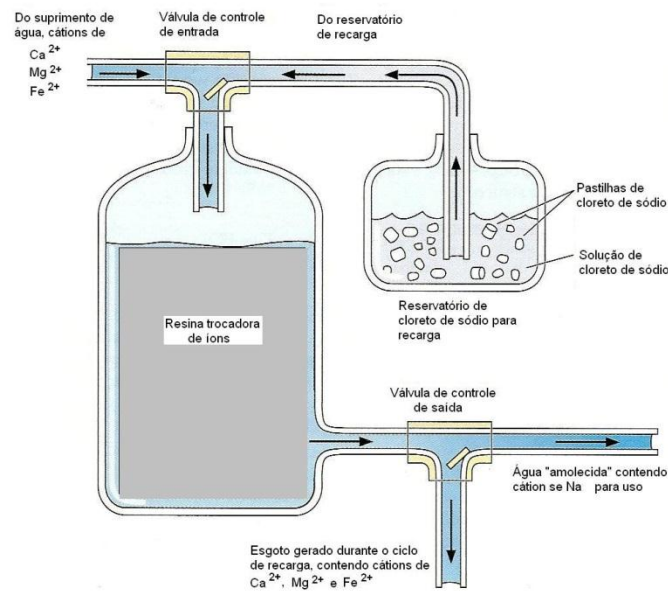



Figura 19.3 – Sistema de tratamento de água com resina de troca iônica e sua regeneração